

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



# РЕОЛОГІЯ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»,  
освітньою програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних  
та будівельних матеріалів і виробів»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Реологія: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньої програми «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І. І. Івіцький, І. О. Мікульонок. – Електронні текстові дані (1 файл: 2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 35 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 25.04.2019 р.)  
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету (протокол № 1 від 28.01.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# РЕОЛОГІЯ

## Практикум

Укладачі: *Івіцький Ігор Ігорович*, канд. техн. наук  
*Мікульонок Ігор Олегович*, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний  
редактор *Карвацький А. Я.*, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: *Петухов А. Д.*, д-р техн. наук, проф.

Призначення практикуму – закріпити та поглибити теоретичний програмний матеріал, оволодіти практичними навичками розрахунку процесів течії полімерних та силікатних матеріалів. Практикум містить описи тринадцяти практичних робіт. Кожній роботі передують коротка теоретична частина, яка знайомить студентів з поняттями, використовуваними в роботах, обґрунтовується вибір теми, об'єкта й методу дослідження. У кінці посібника наведено список рекомендованих навчально-методичних матеріалів.

© І. І. Івіцький, І. О. Мікульонок, 2019  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІХФ), 2019

## **ВСТУП**

Практикум призначений для підготовки та проведення практичних робіт з навчальної дисципліни «Реологія» для студентів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», освітньою програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» денної форми навчання. Призначення практикуму – сприяти розвитку навичок самостійного розрахунку реологічних властивостей матеріалів. Практикум містить описи тринадцяти практичних робіт. Кожній групі робіт передують коротка теоретична частина, яка знайомить студентів з поняттями, використовуваними в роботах, обґрунтовується вибір теми, об'єкта й методу дослідження. Залежно від програми курсу викладач може вибирати (варіювати) відповідні теми, роботи й завдання. У кінці практикуму наведено перелік рекомендованої літератури до усіх тем.

### **МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ**

Мета проведення практичних робіт – закріпити та поглибити теоретичний програмний матеріал, оволодіти практичними навичками розрахунку реологічних характеристик. Включення самостійної роботи студентів у навчальну програму як її основної складової частини потребує подальшого вдосконалення методики проведення практичних занять, підвищенню їхньої ефективності. До кожного практичного заняття студент має виконати певний обсяг самостійної роботи, яка передбачена робочою навчальною програмою дисципліни «Реологія». Основні теоретичні та методологічні питання за темою заняття наведено в преамбулі кожної практичної роботи. Для якісного засвоєння теоретичного матеріалу необхідно виконати рекомендоване домашнє завдання до кожного розділу курсу. Оформлення звіту про виконання індивідуального завдання сприяє розвитку у студентів самостійної ініціативи в роботі, формує вміння проводити необхідні порівняння та співставлення, знаходити взаємозв'язки окремих явищ, а також робити обґрунтовані висновки з проведених результатів досліджень.

# Практична робота №1

## ВИЗНАЧЕННЯ ДЕВІАТОРА НАПРУЖЕНЬ

**Мета роботи:** Опанувати навички розрахунку девіатора тензора напружень за умови всебічного розтягу/стиснення.

### Основні теоретичні положення

Девіатор напруження – це такий тензор напруження, компоненти якого отримані відніманням компонент сферичного тензора із компонент повного тензора напруження

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} I_1 \cdot \delta_{ij},$$

де  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  – перший інваріант повного тензора напруження,

$\delta_{ij} = \begin{vmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{vmatrix}$  – сферичний тензор (дельта Кронекера).

### Порядок виконання роботи

1. Визначити девіатор тензора напруження в загальному вигляді, використовуючи напрям дії напруження згідно рис. 1.1 та відповідних знаків у табл. 1.1.
2. Підставити значення напружень у компоненти визначеного девіатора напружень.
3. Вказати на елементарному об'ємі напрямки та значення дії напружень.

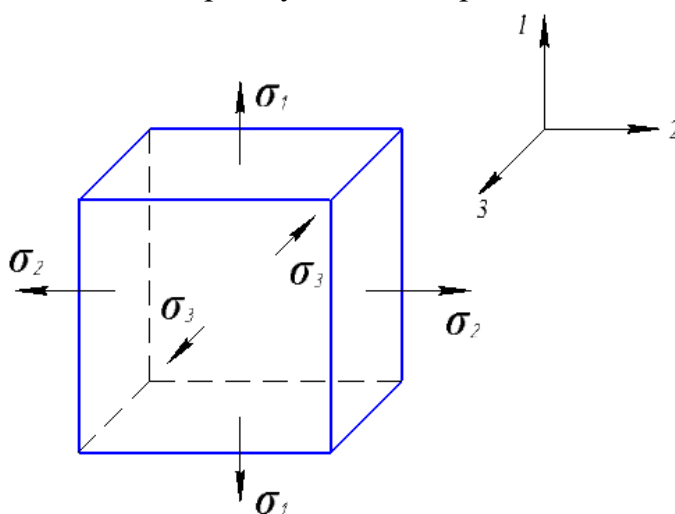


Рис. 1.1. Елемент об'єму з позначеними напруженнями

## Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 1.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 1.1. Завдання на роботу

Варіант	$\sigma_1$ , Па	$\sigma_2$ , Па	$\sigma_3$ , Па
1	5	4	3
2	-5	4	3
3	5	-4	6
4	5	4	-6
5	-5	-8	3
6	5	-8	-3
7	-5	8	-6
8	-5	-8	-6
9	10	4	3
10	-10	4	3
11	10	-4	6
12	10	4	-6
13	-10	-8	3
14	10	-8	-3
15	-10	8	-6
16	-10	-8	-6

## Практична робота №2

### ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ІДЕАЛЬНО ПРУЖНОГО ТІЛА

**Мета роботи:** Навчитися визначати величину деформації ідеально пружного тіла за умови всебічного розтягу/стиснення.

#### Основні теоретичні положення

Згідно закону Гука в тензорній формі

$$\sigma'_{ij} = 2G\varepsilon'_{ij}$$

Модуль зсуву визначається як

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.  
Деформація по Генкі

$$\varepsilon^H = \ln \lambda,$$

де  $\lambda = \frac{l_k}{l_0}$  – ступінь видовження.

#### Порядок виконання роботи

1. Визначити девіатор тензора напруження використовуючи напрям дії напруження згідно з рис. 2.1 і даним з табл. 2.1.
2. Згідно закону Гука в тензорній формі визначити девіатор тензора деформації. Матеріал тіла та модуль пружності під час розтягу наведено в таблиці.
3. Визначити модуль зсуву.
4. Вказати на елементарному об'ємі величину та напрям деформації. Враховуючи, що початкові розміри тіла –  $1 \times 1 \times 1$  м.

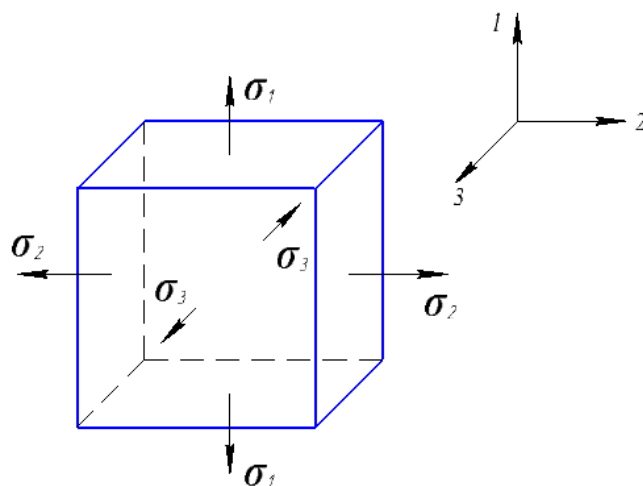


Рис. 2.1. Елемент об'єму з позначеними напруженнями

### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 2.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи. У табл. 2.2 наведено модуль пружності під час розтягу для різних матеріалів.

Табл. 2.1. Завдання на роботу

Варіант	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа	$\sigma_3$ , МПа	Матеріал
1	50	40	30	сталь
2	-50	40	30	чавун
3	50	-40	60	алюміній
4	50	40	-60	мідь
5	-50	-80	30	титан
6	50	-80	-30	бронза
7	-50	80	-60	нікель
8	-50	-80	-60	хром
9	100	40	30	сталь
10	-100	40	30	чавун
11	100	-40	60	алюміній
12	100	40	-60	мідь
13	-100	-80	30	титан
14	100	-80	-30	бронза
15	-100	80	-60	нікель
16	-100	-80	-60	хром

Табл. 2.2. Характеристики матеріалів

Матеріал	Модуль пружності під час розтягу, ГПа
Сталь	200
Чавун	120

Алюміній	70
Мідь	110
Титан	120
Бронза	100
Нікель	210
Хром	300



## Практична робота №3

# ОБРОБКА ДАНИХ КРИВИХ ТЕЧІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи:** Набути навичок обробки даних кривих течії полімерних матеріалів та визначення коефіцієнту консистенції та індексу течії.

### Основні теоретичні положення

Степенева рідина – це така рідина, течія якої проходить по степеневому закону залежності в'язкості від швидкості зсуву:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n,$$

де  $\tau$  – напруження зсуву, Па;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ ;  $k$  – коефіцієнт консистенції;  $n$  – індекс течії.

Кривою течії називають залежність напруження зсуву від швидкості зсуву, яке зазвичай наводять у логарифмічних координатах.

Якщо індекс течії менше 1, то рідину називають псевдопластичною, яка зменшує в'язкість при збільшенні швидкості зсуву. Якщо індекс течії  $n > 1$ , при збільшенні швидкості зсуву в'язкість збільшується і її називають ділатантною.

При представленні рівняння степеневі рідини у логарифмічних координатах воно набуває вигляду:

$$\log(\tau) = k + \log(\dot{\gamma}) \cdot n,$$

з рівняння коефіцієнт консистенції визначається як  $k = \tau$  при  $\dot{\gamma} = 0$ , а індекс течії визначається як:

$$n = \frac{\log(\tau_2) - \log(\tau_1)}{\log(\dot{\gamma}_2) - \log(\dot{\gamma}_1)}.$$

### Порядок виконання роботи

1. Дані для обчислення індексу течії та коефіцієнту консистенції взяти з табл. 3.1.
2. Визначити криві течії для обробки з Додатку А.
3. Визначити індексу течії та коефіцієнту консистенції за наведеними формулами.
4. Зробити висновки про відмінність у характеристиках різних полімерних матеріалів.

## Індивідуальні завдання на роботу

Згідно з варіантом визначити індекс течії та коефіцієнт консистенції заданих полімерних матеріалів за певних температур.

Табл. 3.1. Завдання на роботу

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ПЕНГ	140	160	180	200	140	160	180	200	140	160	180	200	140	160	180	200	140	160	180	200	140	160	180	200	140
ПП	190	210	230	250	190	210	230	250	190	210	230	250	190	210	230	250	190	210	230	250	190	210	230	250	190
ПС	170	220	190	170	220	190	170	220	220	190	170	220	190	170	220	220	170	170	220	190	170	220	190	170	190
ПЕВГ	220	200	180	160	220	200	180	160	220	200	180	160	220	200	180	160	220	200	180	160	220	200	180	160	220

## Практична робота №4

# ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ НЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

**Мета роботи:** Опанувати визначення розподілу напружень, швидкостей зсуву та швидкостей під час течії ньютонівських рідин.

### Основні теоретичні положення

Для **ньютонівської рідини** застосовуються наведені нижче рівняння для визначення напруження зсуву, швидкості зсуву та швидкості рідини.

Напруження зсуву на безрозмірному радіусі

$$\tau(\beta) = \frac{P \cdot r_w}{2l} \beta,$$

де  $P$  – тиск, Па,  $r_w$  – радіус каналу, м,  $l$  – довжина каналу, м,  $\beta$  – безрозмірний радіус

$$\beta = \frac{r}{r_w},$$

де  $r$  – радіус, м.

Швидкість зсуву на безрозмірному радіусі

$$\dot{\gamma}(\beta) = \frac{\tau_w}{\eta} \beta,$$

де  $\eta$  – в'язкість, Па·с;

Швидкість на безрозмірному радіусі

$$u(\beta) = \frac{1}{2} r_w \dot{\gamma}_w (1 - \beta^2).$$

### Порядок виконання роботи

5. Дані для обчислення параметрів руху рідини та побудови графіків взяти з табл. 4.1.

6. Визначити розподіл напружень та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.

7. Визначити розподіл швидкостей зсуву та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.

8. Визначити розподіл швидкостей та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.

### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 4.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 4.1. Завдання на роботу

Варіант	P, МПа	$r_w$ , мм	$l$ , м	$\eta$ , Па·с
1	0,2	200	0,5	$1 \cdot 10^4$
2	0,3	400	0,5	$2 \cdot 10^4$
3	0,4	200	0,5	$3 \cdot 10^4$
4	0,5	400	0,5	$4 \cdot 10^4$
5	0,6	200	0,5	$5 \cdot 10^4$
6	0,7	400	0,5	$6 \cdot 10^4$
7	0,8	200	0,5	$7 \cdot 10^4$
8	0,9	400	0,5	$8 \cdot 10^4$
9	0,2	200	0,5	$9 \cdot 10^4$
10	0,3	400	1	$1 \cdot 10^5$
11	0,4	200	1	$2 \cdot 10^5$
12	0,5	400	1	$3 \cdot 10^5$
13	0,6	200	1	$4 \cdot 10^5$
14	0,7	400	1	$5 \cdot 10^5$
15	0,8	200	1	$6 \cdot 10^5$
16	0,9	400	1	$7 \cdot 10^5$

## Практична робота №5

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕЧІЇ СТЕПЕНЕВИХ РІДИН

**Мета роботи:** Опанувати визначення розподілу напружень, швидкостей зсуву та швидкостей під час течії степеневих рідин.

#### Основні теоретичні положення

Для **степеневі рідини** застосовуються наведені нижче рівняння для визначення напруження зсуву, швидкості зсуву та швидкості рідини.

Напруження зсуву на безрозмірному радіусі

$$\tau(\beta) = \frac{P \cdot r_w}{2l} \beta.$$

Швидкість зсуву на безрозмірному радіусі

$$\dot{\gamma}(\beta) = \tau_w^n \beta^{n-1},$$

де  $k$  – коефіцієнт консистенції,  $n$  – індекс течії.

Швидкість на безрозмірному радіусі

$$u(\beta) = \frac{n}{n+1} r_w \dot{\gamma}_w \left( 1 - \beta^{\frac{n+1}{n}} \right)$$

#### Порядок виконання роботи

1. Дані для обчислення параметрів руху рідини та побудови графіків взяти з табл. 5.1.
2. Визначити розподіл напружень та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.
3. Визначити розподіл швидкостей зсуву та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.
4. Визначити розподіл швидкостей та показати на графіку розподіл параметру по поперечному перерізу каналу.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 5.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 5.1. Завдання на роботу

Варіант	$P$ , МПа	$r_w$ , мм	$l$ , м	$\eta$ , Па·с	$n$	$k$
1	0,2	200	0,5	$1 \cdot 10^4$	0,1	0,5
2	0,3	400	0,5	$2 \cdot 10^4$	0,2	0,6
3	0,4	200	0,5	$3 \cdot 10^4$	0,3	0,7
4	0,5	400	0,5	$4 \cdot 10^4$	0,4	0,8
5	0,6	200	0,5	$5 \cdot 10^4$	0,5	0,5
6	0,7	400	0,5	$6 \cdot 10^4$	0,6	0,6
7	0,8	200	0,5	$7 \cdot 10^4$	0,7	0,7
8	0,9	400	0,5	$8 \cdot 10^4$	0,8	0,8
9	0,2	200	0,5	$9 \cdot 10^4$	0,9	0,9
10	0,3	400	1	$1 \cdot 10^5$	0,1	1
11	0,4	200	1	$2 \cdot 10^5$	0,2	1,1
12	0,5	400	1	$3 \cdot 10^5$	0,3	1,2
13	0,6	200	1	$4 \cdot 10^5$	0,4	0,9
14	0,7	400	1	$5 \cdot 10^5$	0,5	1
15	0,8	200	1	$6 \cdot 10^5$	0,6	1,1
16	0,9	400	1	$7 \cdot 10^5$	0,7	1,2

## Практична робота №6

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ЗА УМОВИ СТАЛОЇ ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Навчитися будувати температурну залежність в'язкості матеріалу за умови сталої швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

Виходячи з рівняння Ареніуса–Френкеля–Ейрінга, залежність в'язкості від температури для неньютонівської рідини описується виразом

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = k_0 \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \dot{\gamma}^{n-1},$$

де  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ ;  $k_0$  – коефіцієнт консистенції при базовій температурі  $T_0$ ;  $E$  – енергія активації в'язкої течії в Дж/моль;  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,4$  Дж/моль·град;  $T$  – температура, К.

Енергія активації визначається

$$E = R \frac{\ln k(T) - \ln k_0}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}}.$$

Для степеневі рідини напруження зсуву

$$\tau(\dot{\gamma}) = k \dot{\gamma}^n.$$

Виходячи з експериментальних даних (Додаток А) можливо визначити коефіцієнти рівняння.

Коефіцієнт консистенції  $k$  визначається як точка перетину кривої течії з віссю ординат.

Нахил кривої течії визначається індексом течії  $n$ , який являє собою кутовий коефіцієнт

$$n = \frac{\ln \tau_2 - \ln \tau_1}{\ln \dot{\gamma}_2 - \ln \dot{\gamma}_1}.$$

## Порядок виконання роботи

1. Визначити для заданого матеріалу індекс течії за базової температури, використовуючи наведені криві течії.
2. Визначити енергію активації, використовуючи коефіцієнти консистенції для базової та максимальної температури на кривих течії.
3. Побудувати графік залежності в'язкості від температури за сталої швидкості зсуву виходячи з рівняння Ареніуса–Френкеля–Ейрінга.

## Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 6.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи. У Додатку А наведено відповідні графіки залежності напруження зсуву від швидкості зсуву для різних матеріалів.

Табл. 6.1. Завдання на роботу

№	Матеріал	$\dot{\gamma}, c^{-1}$
1	Поліетилен низької густини	20
2	Поліетилен високої густини	40
3	Поліпропілен	60
4	Полістирол	80
5	Поліетилен низької густини	100
6	Поліетилен високої густини	200
7	Поліпропілен	300
8	Полістирол	400
9	Поліетилен низької густини	500
10	Поліетилен високої густини	600
11	Поліпропілен	700
12	Полістирол	800
13	Поліетилен низької густини	900
14	Поліетилен високої густини	1000
15	Поліпропілен	1500
16	Полістирол	2000



## Практична робота №7

### ВИВЧЕННЯ СТЕПЕНЕВОГО ЗАКОНУ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості степеневому закону залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

Існує декілька законів, що описують залежність в'язкості рідини від швидкості зсуву під час течії рідини. Вибір того чи іншого закону залежить від умов його застосування та типу матеріалу. Найбільш поширеним для використання є степеневий закон.

**Степеневий закон.** Степеневий закон описується виразом

$$\eta = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1},$$

де  $K$  – коефіцієнт консистенції;  $\lambda$  – час релаксації, с;  $n$  – індекс течії.

Степеневий закон зазвичай використовується, щоб описати в'язку поведінку полімерних матеріалів, таких як поліетилен. Однак, цей закон не може описати поведінку за низьких швидкостей зсуву. Якщо поведінку за низьких швидкостей зсуву має бути також враховано, слід використовувати закон Берда–Карро або Перехресний закон.

#### Порядок виконання роботи

1. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 7.1
2. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .
3. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 7.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 7.1. Завдання на роботу

№	$\lambda$	$n$	$K$
1	0,01	0,8	1000
2	0,015	0,7	2000

3	0,02	0,6	3000
4	0,025	0,5	4000
5	0,03	0,4	5000
6	0,01	0,3	6000
7	0,015	0,2	7000
8	0,02	0,1	8000
9	0,025	0,8	1000
10	0,03	0,7	2000
11	0,01	0,6	3000
12	0,015	0,5	4000
13	0,02	0,4	5000
14	0,025	0,3	6000
15	0,03	0,2	7000
16	0,01	0,1	8000

## Практична робота №8

### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ БЕРДА–КАРРО ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості закону Берда–Карро залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

**Закон Берда–Карро.** Закон Берда–Карро описується виразом

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2\right)^{\frac{n-1}{2}},$$

де  $\eta_{\infty}$  – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву, Па·с;  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с,  $\lambda$  – час релаксації, с;  $n$  – індекс течії.

Закон зазвичай використовується, коли необхідно описати поведінку речовини за низьких швидкостей зсуву.

#### Порядок виконання роботи

1. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 8.1
2. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .
3. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 8.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 8.1. Завдання на роботу

№	$\eta_0$	$\eta_{\infty}$	$\lambda$	$n$
1	7000	0	0,01	0,8
2	8000	10	0,015	0,7
3	9000	20	0,02	0,6
4	10000	30	0,025	0,5
5	11000	40	0,03	0,4
6	12000	50	0,01	0,3
7	13000	0	0,015	0,2

8	14000	10	0,02	0,1
9	7000	20	0,025	0,8
10	8000	30	0,03	0,7
11	9000	40	0,01	0,6
12	10000	50	0,015	0,5
13	11000	0	0,02	0,4
14	12000	10	0,025	0,3
15	13000	20	0,03	0,2
16	14000	30	0,01	0,1

## Практична робота №9

### ВИВЧЕННЯ ПЕРЕХРЕСНОГО ЗАКОНУ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості перехресного закону залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

**Перехресний закон.** Перехресний закон описується виразом

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m},$$

де  $m$  – показник перехресного закону;  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с;  $\lambda$  – час релаксації, с.

Як і закон Берда–Карро, зазвичай використовується, коли необхідно описати поведінку речовини при низьких швидкостях зсуву.

#### Порядок виконання роботи

1. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 9.1
2. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .
3. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 9.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 9.1. Завдання на роботу

№	$\eta_0$	$\lambda$	$m$
1	7000	0,01	0,8
2	8000	0,015	0,7
3	9000	0,02	0,6
4	10000	0,025	0,5
5	11000	0,03	0,4
6	12000	0,01	0,3

7	13000	0,015	0,2
8	14000	0,02	0,1
9	7000	0,025	0,8
10	8000	0,03	0,7
11	9000	0,01	0,6
12	10000	0,015	0,5
13	11000	0,02	0,4
14	12000	0,025	0,3
15	13000	0,03	0,2
16	14000	0,01	0,1

## Практична робота №10

### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ БІНГАМА ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості закону Бінгама залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

**Закон Бінгама.** Закон Бінгама описується виразом

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \tau_0 / \dot{\gamma}, & \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c \\ \eta_0 + \tau_0 \frac{2 - \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_c}, & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \end{cases},$$

де  $\tau_0$  – границя текучості, Па;  $\dot{\gamma}_c$  – критична швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ ,  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с.

Закон Бінгама зазвичай використовується, щоб описати такі матеріали, як бетон, бруд, тісто, зубна паста, для яких в'язкість постійна після того, як досягнуто критичне напруження зсуву, зазвичай на досить низьких швидкостях зсуву.

#### Порядок виконання роботи

1. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 10.1
2. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .
3. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 10.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 10.1. Завдання на роботу

№	$\eta_0$	$\tau_0$	$\dot{\gamma}_c$
1	7000	300	300
2	8000	400	400
3	9000	500	500
4	10000	600	600

5	11000	700	300
6	12000	800	400
7	13000	900	500
8	14000	1000	600
9	7000	300	300
10	8000	400	400
11	9000	500	500
12	10000	600	600
13	11000	700	300
14	12000	800	400
15	13000	900	500
16	14000	1000	600



## Практична робота №11

### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ГЕРШЕЛЯ–БАЛКЛІ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості закону Гершеля–Балклі залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

**Закон Гершеля–Балклі.** Закон Гершеля–Балклі описується виразом

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1}, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \\ \frac{\tau_0 \left( 2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)}{\dot{\gamma}_c} + K \left[ (2-n) + (n-1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right], & \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \end{cases}.$$

де  $K$  – коефіцієнт консистенції;  $n$  – індекс течії;  $\tau_0$  – границя текучості, Па;  $\dot{\gamma}_c$  – критична швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ .

Цей закон зазвичай використовується, щоб описати матеріали, для яких має місце степеневий закон в'язкості після того, як критичне напруження зсуву досягнуто.

#### Порядок виконання роботи

4. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 11.1

5. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .

6. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 11.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 11.1. Завдання на роботу

№	$n$	$K$	$\tau_0$	$\dot{\gamma}_c$
1	0,8	1000	300	300

2	0,7	2000	400	400
3	0,6	3000	500	500
4	0,5	4000	600	600
5	0,4	5000	700	300
6	0,3	6000	800	400
7	0,2	7000	900	500
8	0,1	8000	1000	600
9	0,8	1000	300	300
10	0,7	2000	400	400
11	0,6	3000	500	500
12	0,5	4000	600	600
13	0,4	5000	700	300
14	0,3	6000	800	400
15	0,2	7000	900	500
16	0,1	8000	1000	600

## Практична робота №12

### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ КАРРО–ЯСУДИ ЗАЛЕЖНОСТІ В'ЯЗКОСТІ ВІД ШВИДКОСТІ ЗСУВУ

**Мета роботи:** Дослідити та проаналізувати особливості закону Карро–Ясуди залежності в'язкості від швидкості зсуву.

#### Основні теоретичні положення

**Закон Карро–Ясуди.** Закон Карро–Ясуди описується виразом

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}},$$

де  $a$  – показник, що визначає переміщення від ньютонівського закону до області степеневому закону;  $\eta_{\infty}$  – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву, Па·с;  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с;  $\lambda$  – час релаксації, с;  $n$  – індекс течії.

Закон Карро–Ясуда – тонка варіація закону Берда-Карро. Додатковий показник дозволяє управляти переміщенням від ньютонівського закону до області степеневому закону. Низькі значення  $a$  подовжують переміщення, а високі – роблять перехід більш різким.

#### Порядок виконання роботи

1. Обчислити щонайменше п'ять значень в'язкості при різних значеннях швидкостей зсуву в діапазоні значень від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$  використовуючи наведений вище закон та дані з табл. 12.1
2. Побудувати графік залежності в'язкості від швидкості зсуву в діапазоні від  $100 \text{ с}^{-1}$  до  $1000 \text{ с}^{-1}$ .
3. Проаналізувати поведінку графіку при різних значеннях швидкостей зсуву.

#### Індивідуальні завдання на роботу

У табл. 12.1 наведено індивідуальні завдання на практичну роботу, де варіант відповідає номеру студента за списком академічної групи.

Табл. 12.1. Завдання на роботу

№	$\eta_0$	$\eta_{\infty}$	$\lambda$	$n$	$a$
1	7000	0	0,01	0,8	0,1
2	8000	10	0,015	0,7	0,2
3	9000	20	0,02	0,6	0,3

4	10000	30	0,025	0,5	0,4
5	11000	40	0,03	0,4	0,5
6	12000	50	0,01	0,3	0,6
7	13000	0	0,015	0,2	0,7
8	14000	10	0,02	0,1	0,8
9	7000	20	0,025	0,8	0,9
10	8000	30	0,03	0,7	0,1
11	9000	40	0,01	0,6	0,2
12	10000	50	0,015	0,5	0,3
13	11000	0	0,02	0,4	0,4
14	12000	10	0,025	0,3	0,5
15	13000	20	0,03	0,2	0,6
16	14000	30	0,01	0,1	0,7

## Практична робота №13

### ОБРОБКА ДАНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи:** Навчитися визначати теплофізичні властивості полімерних матеріалів за допомогою експериментальних таблиць.

#### Основні теоретичні положення

При розрахунку або моделюванні течії полімерних матеріалів виникає необхідність отримання значень властивостей полімерних матеріалів при певній температурі.

До теплофізичних властивостей матеріалу відносять наступні властивості.

**Теплопровідність** – це здатність речовини переносити теплову енергію, а також кількісна оцінка цієї здатності: фізична величина, що характеризує інтенсивність теплообміну в речовині, яка дорівнює відношенню густини теплового потоку до градієнта температури. Показником є коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м·°C).

**Температуропровідність** – це фізична величина, що характеризує швидкість зміни (вирівнювання) температури речовини у нерівноважних теплових процесах. Показником є коефіцієнт температуропровідності  $a \cdot 10^6$ , м²/с.

**Густина** – це відношення маси речовини (матеріалу) до її об'єму. Показником є густина  $\rho$ , кг/м³.

**Теплоємність** матеріалу характеризує його здатність акумулювати тепло. Показником є питома теплоємність  $C_p$ , кДж/(кг·°C) - кількість теплоти, яка необхідно для того, щоб нагріти 1 кг маси матеріалу на 1 °K (або на 1 °C).

Для визначення властивості матеріалу при певній температурі використовують лінійну інтерполяцію

$$y(x) = y(x_1) + \frac{y(x_2) - y(x_1)}{x_2 - x_1} (x - x_1).$$

*Наприклад.* Відомо, що теплоємність якогось матеріалу при температурі  $T_1 = 20$  °C складає  $C_{p1} = 2,16$  кДж/(кг·°C), а при температурі  $T_2 = 30$  °C складає  $C_{p2} = 2,61$  кДж/(кг·°C), знайти теплоємність  $C_p$  матеріалу за температури  $T = 23,5$  °C.

В даному випадку, теплоємність – це функція, а температура – її аргумент. Відповідно:  $T_1$  – це  $x_1$ ,  $T_2$  – це  $x_2$ ,  $C_{p1}$  – це  $y(x_1)$ ,  $C_{p2}$  – це  $y(x_2)$ , шукана  $C_{p1}$  – це  $y(x)$  за температури  $T$ , яка є  $x$

$$C_p = C_{p1} + \frac{C_{p2} - C_{p1}}{T_2 - T_1} (T - T_1) = 2,16 + \frac{2,61 - 2,16}{30 - 20} (23,5 - 20) = 2,32$$

кДж/(кг·°C).

## Порядок виконання роботи

1. Отримати вихідні дані для виконання завдання.
2. Знайти у таблицях теплофізичних властивостей необхідні дані.
3. Визначити основні теплофізичні параметри трьох полімерних матеріалів за певних температур.

## Індивідуальні завдання на роботу

Згідно з варіантами, що наведено у табл. 13.1, визначити основні теплофізичні параметри трьох полімерних матеріалів за певних температур.

Табл. 13.1. Завдання на роботу

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ПП	22	119	173	31	130	174	48	139	181	56	150	185	67	160	189	74	166	192	89	168	200	94	171	204	109
ПЕТ	64	118	163	68	125	175	73	131	182	83	135	199	89	142	215	94	151	223	102	159	247	111	252	267	271
ПВХ	93	97	102	109	111	116	124	127	133	138	142	147	153	159	162	166	174	178	181	187	192	199	106	157	197

Табл. 13.2. Властивості поліпропілену (ПП)

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\alpha\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
13,5	0,193	0,124	862	1,81
38,8	0,194	0,122	859	1,84
61,3	0,194	0,117	857	1,94
80	0,195	0,115	851	1,99
102	0,195	0,107	844	2,16
124,2	0,194	0,089	828	2,61
142	0,188	0,070	810	3,28
163,8	0,168	0,039	793	5,40
170,6	0,160	0,022	758	9,77
173,5	0,205	0,093	750	2,93
174,2	0,214	0,130	741	2,42
210	0,237	0,088	702	3,81

Табл. 13.3. Властивості поліетилентерефталату (ПЕТ)

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\alpha\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
60	0,218	0,154	1308	1,08
80	0,225	0,153	1304	1,12
100	0,231	0,152	1301	1,17
120	0,238	0,15	1298	1,22
140	0,245	0,149	1290	1,27
160	0,252	0,147	1283	1,33
180	0,258	0,143	1275	1,41
200	0,265	0,137	1265	1,52
220	0,272	0,124	1243	1,76
240	0,278	0,102	1210	2,26

260	0,303	0,057	1117	4,50
280	0,45	0,136	1090	3,68

Табл. 13.4. Властивості полівінілхлориду (ПВХ)

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$a\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
90	0,202	0,075	1547	1,83
100	0,201	0,072	1545	1,87
110	0,2	0,069	1543	1,92
120	0,198	0,066	1541	1,97
130	0,196	0,063	1539	2,02
140	0,193	0,059	1537	2,07
150	0,19	0,056	1535	2,12
160	0,183	0,053	1533	2,16
170,5	0,158	0,023	1531	2,21
179,5	0,172	0,05	1529	2,25
190	0,176	0,046	1527	2,3
200	0,178	0,043	1526	2,35

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1. Реологія: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», освітньої програми «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І. І. Івіцький. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/26729>
2. Малкин А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 560 с.
3. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров / Д. Х. Чанг. – Москва : Химия, 1979. – 368 с.
4. Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт. – Москва : Химия, 1965. – 747 с.
5. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров / И. Уорд. – Москва : Химия, 1975. – 350 с.
6. Теплофизические и реологические свойства полимеров: справочник / ред. Липатов Ю. С. – Киев : Наукова думка, 1977. – 244 с.
7. Пахаренко В. А. Наполненные термопласты: справочник / В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, Е. М. Кириенко. – Киев : Техніка, 1986. – 182 с.
8. Сокольський О. Л. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів / О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонок // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2014. — №2(94). — С. 66—69.
9. Sokolskyi A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment / A. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi // Modern Scientific Research and their Practical application. — 2014. — Vol. J21410 . — P. 137—140.
10. Sivetskyi V. I. Methods for Determining the Presence, Character and Value of Wall Effects in Flow of Polymer Material / V. I. Sivetskyi, O. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi // Technology Audit and Production Reserves. — 2015. — Vol 3, N 4(23). — P. 48—52.
11. Двойнос Я. Г. Уточнена методика оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії / Я. Г. Двойнос, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2015. — №1(14). — С. 51—54.
12. Сівецький В. І. Визначення залежності швидкості полімерних матеріалів поблизу стінки круглого каналу від напруження зсуву / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький, В. М. Куриленко // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2015. — №1(14). — С. 44—47.
13. Івіцький І. І. Формування полімерних матеріалів. Дослідження впливу геометричних параметрів каналів обладнання на величину пристінних ефектів / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, В. І. Сівецький // Хімічна промисловість України. — 2015. — №4(129). — С. 41—44.



14. Сівецький В. І. Моделювання гомогенізації розплавів термопластів у бар'єрному змішувачі з урахуванням ефекту пристінного проковзування / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, М. С. Кушнір, І. І. Івіцький // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2016. — №1. — С. 45—50.
15. Ivitskiy I. I. Influence of a Lubricant on the Flow Parameters of a Molten Polymeric Material in Channels of Forming Devices / I. I. Ivitskiy, A. L. Sokolskiy, I. O. Mikulionok // Chemical and Petroleum Engineering. — 2017. — Vol 53, Issue 1-2. — P. 84—88.
16. Ivitskiy I. I. Extrusion of Intellectual Polymer Materials / I. I. Ivitskiy // Web of Scholar. — 2018. — N 5(23), Vol 1. — P. 15—18.
17. Івіцький І. І. Експериментальні дослідження процесу плавлення полімеру / І. І. Івіцький, О. Л. Сокольський // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. — 2018. — Том 29(68), №3. — С. 14—19.
18. Івіцький І. І. Моделювання процесу плавлення полімерного матеріалу в каналі екструдера 3D принтера / І. І. Івіцький, В. В. Соловей, О. Л. Сокольський // Modern Scientific Researches. — 2018. — Issue 4, Vol. 1. — С. 25—28.
19. Івіцький І. І. Вплив параметрів тривимірного друку на фізико-механічні властивості виробів із термопластів / І. І. Івіцький, В. В. Соловей, О. Л. Сокольський // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2018. — № 1(17). — С. 17—23.

## Додаток А. Властивості полімерних матеріалів

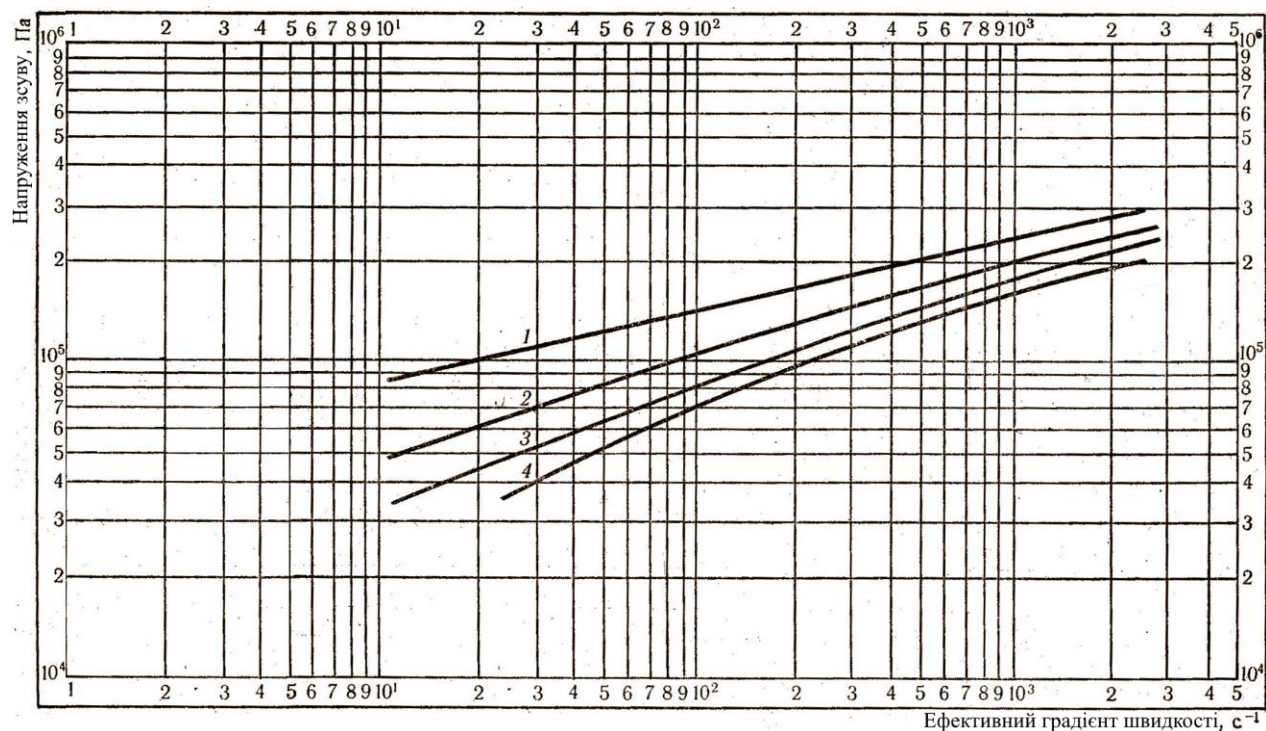


Рис. А.1. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для поліетилену низької густини (ПЕНГ) при температурі: 1 – 413К, 2 – 433К, 3 – 453К, 4 – 473К

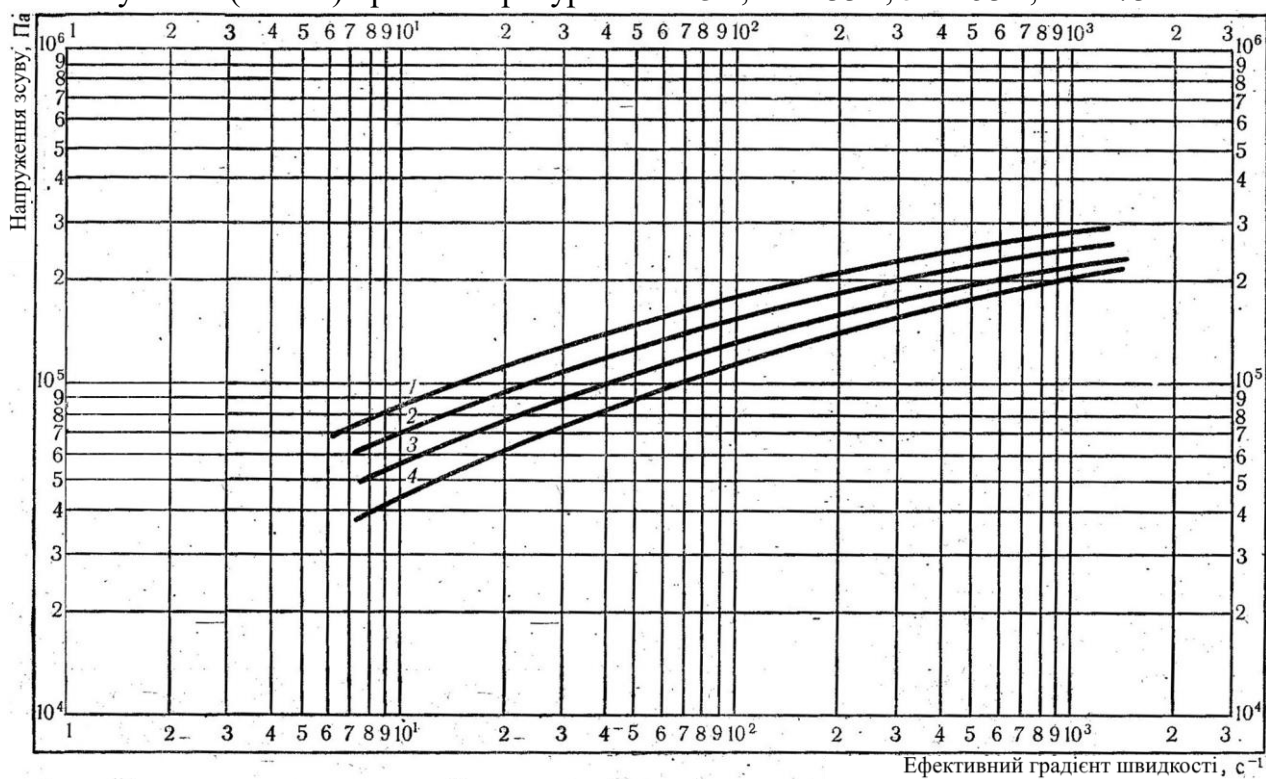


Рис. 2. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для поліетилену високої густини (ПЕВГ) при температурі: 1 – 433К, 2 – 453К, 3 – 473К, 4 – 493К

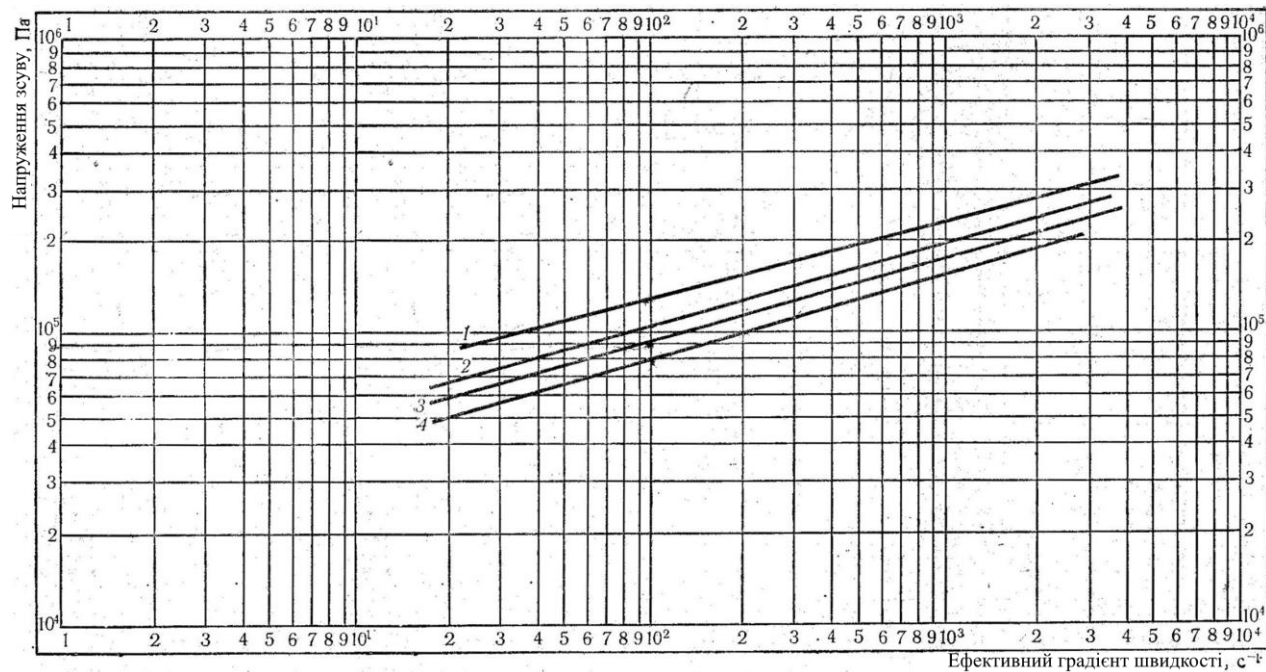


Рис. 3. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для поліпропілену (ПП) при температурі: 1 – 463К, 2 – 483К, 3 – 503К, 4 – 523К

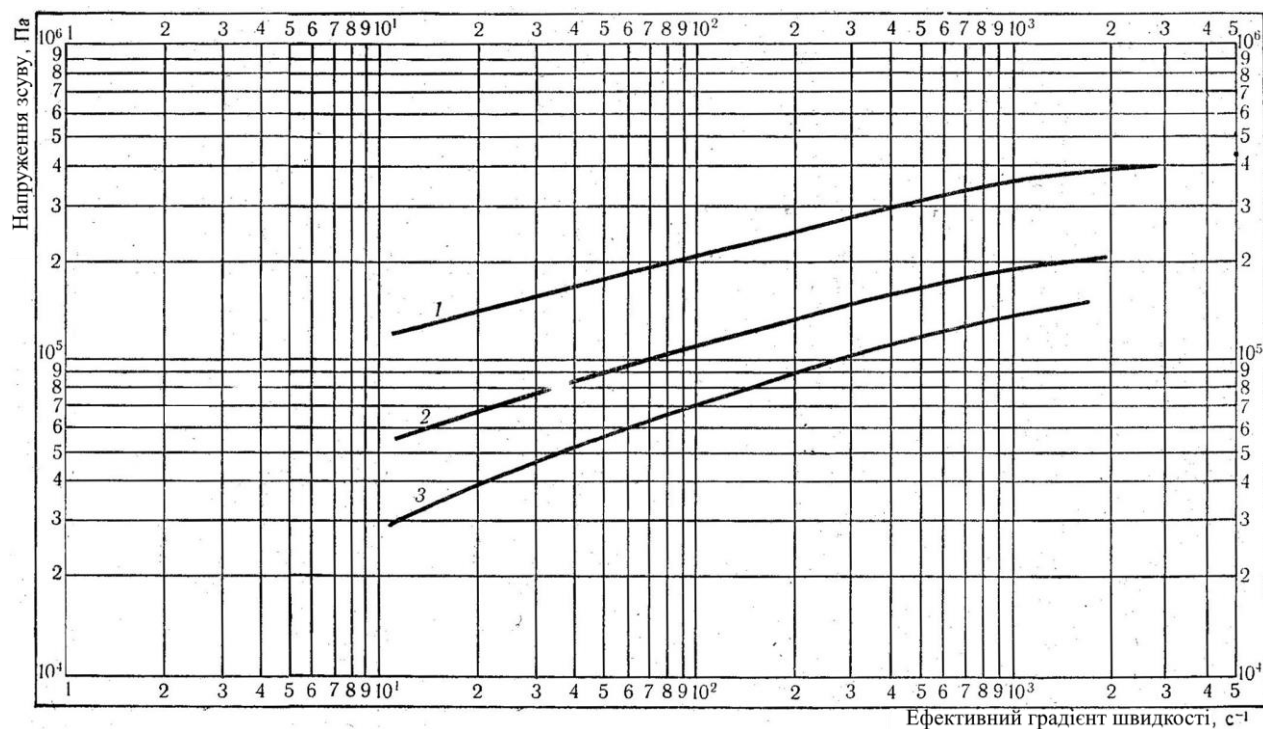


Рис. 4. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву для полістиролу (ПС) при температурі: 1 – 443К, 2 – 463К, 3 – 493К

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	1
Практична робота №1 .....	3
Практична робота №2 .....	5
Практична робота №3 .....	8
Практична робота №4 .....	10
Практична робота №5 .....	12
Практична робота №6 .....	14
Практична робота №7 .....	16
Практична робота №8 .....	18
Практична робота №9 .....	20
Практична робота №10 .....	22
Практична робота №11 .....	24
Практична робота №12 .....	26
Практична робота №13 .....	28
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	31
Додаток А. Властивості полімерних матеріалів .....	33